



全国电力高职高专“十二五”规划教材
电力技术类（动力工程）专业系列教材

中国电力教育协会审定

火电厂热力设备及系统

全国电力职业教育教材编审委员会 组编
杨小琨 杨作梁 主编

行动导向式



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



全国电力高职高专“十二五”规划教材
电力技术类（动力工程）专业系列教材

中国电力教育协会审定

火电厂热力设备及系统

全国电力职业教育教材编审委员会 组 编

杨小琨 杨作梁 主 编

王慧丽 何 鹏 邓贤义 副主编

齐 强 主 审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为全国电力高职高专“十二五”规划教材 电力技术类（动力工程）专业系列教材。

本书是根据火电厂辅控、电气运行人员职业岗位要求和火电厂热力设备及系统课程标准编写的。全书分为火电厂生产过程及经济比较、火电厂管道及阀门维护、火电厂辅机设备运行、锅炉设备运行、汽轮机设备运行、火电厂主要热力系统的运行、燃气电厂的生产过程认知、生物质能发电厂的生产过程认知八个学习项目。以国产 600MW 超临界压力火电机组为主要对象，以设备及系统运行为主线，全面阐述了火电厂热力设备及系统的工作原理、结构、典型系统布置和运行操作等方面的基础知识和技能。并结合我国能源发展政策，扩展了燃气及生物质能发电相关技术内容，可用于多学时教学或读者自学。各项目单元后附有项目总结，供复习时使用。

本书可供高职高专院校非热动、集控的其他动力类专业或发电厂及电力系统等相关专业教学使用，也可作为电力行业的培训教材，或作为从事发电厂相关工作的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

火电厂热力设备及系统/杨小琨，杨作梁主编；全国电力职业教育教材编审委员会组编. —北京：中国电力出版社，2014.9

全国电力高职高专“十二五”规划教材. 电力技术类（动力工程）专业系列教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 6233 - 8

I. ①火… II. ①杨…②杨…③全… III. ①火电厂—热力系统—高等教育—教材 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 164221 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 9 月第一版 2014 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 382 千字

定价 32.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

全国电力职业教育教材编审委员会

主 任 薛 静

副 主 任 张薛鸿 赵建国 刘广峰 马晓民 杨金桃 王玉清
文海荣 王宏伟 王宏伟(女) 朱 飙 何新洲 李启煌
陶 明 杜中庆 杨建华 周一平

秘 书 长 鞠宇平 潘劲松

副秘书长 李建强 谭绍琼 武 群 黄定明 樊新军

委 员 (按姓氏笔画顺序)

丁 力	马敬卫	方舒燕	王 宇	王火平	王玉彬
王亚娟	王俊伟	毛文学	兰向春	冯 涛	任 剑
刘家玲	刘晓春	汤晓青	阮予明	齐 强	佟 鹏
余建华	吴金龙	吴斌兵	宋云希	张小兰	张进平
张惠忠	李建兴	李高明	李道霖	李勤道	陈延枫
屈卫东	罗红星	罗建华	郑亚光	郑晓峰	胡 斌
胡起宙	饶金华	倪志良	郭连英	盛国林	章志刚
黄红荔	黄益华	黄蔚雯	龚在礼	曾旭华	董传敏
解建宝	廖 虎	潘汪杰	操高城	戴启昌	

动力工程专家组

组 长 李勤道 何新洲

副组长 杨建华 董传敏 朱 飙 杜中庆

成 员 (按姓氏笔画顺序)

丁 力 阮予明 齐 强 佟 鹏

屈卫东 武 群 饶金华 黄定明

黄蔚雯 盛国林 龚在礼 曾旭华

操高城 潘汪杰

本书编写组

组 长 杨小琨

副组长 杨作梁

组 员 王慧丽 何 鹏 邓贤义 郭朝令 高 欣

前言

我国的能源结构决定了火力发电,尤其是煤电为主的格局在比较长的时间内不会改变。提高发电机组效率和能源利用率,减少污染物排放,是发电行业技术进步的永恒主题。随着我国国民经济和社会发展第十二个五年规划推进,火力发电技术的发展重点突出在三个方面:清洁高效、大容量燃煤机组,生物质能发电,燃气发电为核心的分布式能源系统。

超临界、超超临界参数燃煤发电技术在我国已大规模商业化运行,其技术成熟先进,不仅效率大幅度提高,加装烟气脱硫、脱硝和除尘装置后足以满足严格的排放标准,是未来二、三十年中洁净煤发电的主流技术。生物质能发电和燃气发电作为降低污染物排放,尤其是碳排放的有效手段,也将发挥越来越重要的作用。

为适应当前火力发电技术的应用现状和发展趋势,满足面向火电厂的电气等非热动类技术人员学习我国主流火力发电设备及运行技术,组织编写了此书。本书比较全面、系统地介绍了超临界参数燃煤电厂的典型热力设备的结构、系统组成、运行维护基本原则,还扩展了燃气发电和生物质能发电的技术特点和生产流程等内容。全书由郑州电力高等专科学校杨小琨和保定电力职业技术学院杨作梁担任主编。项目一由郑州电力高等专科学校杨小琨编写,项目二、项目八由保定电力职业技术学院杨作梁编写,项目三由安徽电气工程职业技术学院何鹏编写,项目四由山西电力职业技术学院王慧丽编写,项目五由国电重庆发电有限责任公司邓贤义编写,项目六由郑州电力高等专科学校杨小琨、高欣和安徽电气工程职业技术学院何鹏编写,项目七由郑州电力高等专科学校郭朝令编写。

本书由西安电力高等专科学校齐强教授担任主审,他对书稿进行了认真审阅,提出许多宝贵的意见和建议。本书在编写过程中,参阅了参考文献中列出的正式出版文献以及相关电厂、制造厂、设计院、安装单位的技术资料、说明书、图纸,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2014年6月

出版说明

为深入贯彻《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020)》精神,落实鼓励企业参与职业教育的要求,总结、推广电力类高职高专院校人才培养模式的创新成果,进一步深化“工学结合”的专业建设,推进“行动导向”教学模式改革,不断提高人才培养质量,满足电力发展对高素质技能型人才的需求,促进电力发展方式的转变,在中国电力企业联合会和国家电网公司的倡导下,由中国电力教育协会和中国电力出版社组织全国14所电力高职高专院校,通过统筹规划、分类指导、专题研讨、合作开发的方式,经过两年时间的艰苦工作,编写完成全国电力高职高专“十二五”规划教材。

本套教材分为电力工程、动力工程、公共基础课、工科专业基础课、学生素质教育五大系列。其中,动力工程专业系列汇集了电力行业高等职业院校专家的力量进行编写,各分册主编为该课程的教学带头人,有丰富的教学经验。教材以行动导向形式编写而成,既体现了高等职业教育的教学规律,又融入电力行业特色,适合高职高专动力工程专业的教学,是难得的行动导向式精品教材。

本套教材的设计思路及特点主要体现在以下几方面。

(1) 按照“行动导向、任务驱动、理实一体、突出特色”的原则,以岗位分析为基础,以课程标准为依据,充分体现高等职业教育教学规律,在内容设计上突出能力培养为核心的教学理念,引入国家标准、行业标准和职业规范,科学合理设计任务或项目。

(2) 在内容编排上充分考虑学生认知规律,充分体现“理实一体”的特征,有利于调动学生学习积极性,是实现“教、学、做”一体化教学的适应性教材。

(3) 在编写方式上主要采用任务驱动、行动导向等方式,包括学习情境描述、教学目标、学习任务描述、任务准备、相关知识等环节,目标任务明确,有利于提高学生学习的专业针对性和实用性。

(4) 在编写人员组成上,融合了各电力高职高专院校骨干教师和企业技术人员,充分体现院校合作优势互补,校企合作共同育人的特征,为打造中国电力职业教育精品教材奠定了基础。

本套教材的出版是贯彻落实国家人才队伍建设总体战略,实现高端技能型人才培养的重要举措,是加快高职高专教育教学改革、全面提高高等职业教育教学质量的具体实践,必将对课程教学模式的改革与创新起到积极的推动作用。

本套教材的编写是一项创新性的、探索性的工作,由于编者的时间和经验有限,书中难免有疏漏和不当之处,恳切希望专家、学者和广大读者不吝赐教。

目 录

出版说明

前言

项目一 火电厂生产过程及经济比较	1
任务一 火电厂生产流程图的绘制	1
任务二 火电厂生产过程的经济性评价	29
项目总结	34
项目二 火电厂管道及阀门维护	35
任务一 火电厂汽水管道的认知和维护	35
任务二 火电厂阀门的认知和维护	43
项目总结	54
项目三 火电厂辅机设备运行	56
任务一 泵与风机的认知	56
任务二 泵与风机的运行	73
项目总结	80
项目四 锅炉设备运行	81
任务一 锅炉规程技术规范的认识	81
任务二 锅炉上水和点火	91
任务三 锅炉的升温升压和升负荷	101
项目总结	116
项目五 汽轮机设备运行	117
任务一 汽轮机主机规程技术规范的认识	117
任务二 汽轮机设备的启动准备	128
任务三 汽轮机设备冲转和运行监控	142
项目总结	153
项目六 火电厂主要热力系统的运行	154
任务一 热力系统图的辨识	154
任务二 冷态启动中主要热力系统的投入	184

项目总结	191
项目七 燃气电厂的生产过程认知	192
任务一 简单燃气轮机循环生产流程图的绘制	192
任务二 燃气—蒸汽联合循环电厂生产流程图的绘制	207
项目总结	213
项目八 生物质能发电厂的生产过程认知	215
任务一 农林废弃物直燃发电厂生产流程图的绘制	215
任务二 垃圾焚烧发电厂生产流程图的绘制	222
任务三 沼气发电厂的生产流程图的绘制	231
项目总结	238
参考文献	240

项目一

火电厂生产过程及经济比较

【项目描述】

火力发电是我国电力生产的主要方式,其本质是将燃料燃烧释放的热能转换为机械能,而后通过发电机转变为电能输出。在掌握相关热力学知识的基础上,通过对火电厂生产流程框图的绘制,建立对火电厂生产过程的总体认识;通过对火电机组主要热经济指标数据的实际分析,培养在不同场合正确应用相应热经济指标的能力。

【教学目标】

能用专业知识正确描述火电厂热能转换为机械能的实现流程,能说出能量转换各环节的具体实现方法、工质状态的变化、能量转换或传递的形式,能在不同场合使用正确的热经济指标。

【教学环境】

多媒体教室结合实训室或利用理实一体化教室实施课程教学,需要具备反映火电厂生产整体流程和火电厂主要设备模型及相应图片、视频和动画资料。

任务一 火电厂生产过程流程图的绘制

【教学目标】

一、知识目标

- (1) 掌握火电厂生产过程中常用的热力学术语;
- (2) 理解热力学第一定律和第二定律的实质及应用;
- (3) 掌握水蒸气的产生过程及其特点;
- (4) 掌握蒸汽动力循环的组成和主要类型;
- (5) 掌握火电厂生产流程和主要设备的作用;
- (6) 了解火电厂各环节的能量转换、传递过程及其特点。

二、能力目标

- (1) 能正确使用常用热力学术语;
- (2) 能应用热力学第一定律分析常见热力设备中的能量转换和传递过程;
- (3) 能应用热力学第二定律解释火电厂生产过程组成的缘由;

- (4) 能描述水蒸气产生过程及其特点,并说出各过程相对应的锅炉受热面名称;
- (5) 能正确描述蒸汽动力循环类型及流程组成,并说出各过程中工质状态的变化和能量形式的转换;
- (6) 能绘制出火电厂生产流程框图并描述出各环节中工质的流程及能量转换、传递情况。

三、态度目标

- (1) 能积极主动学习,在完成任务过程中发现问题、分析问题和解决问题;
- (2) 能与他人有效交流和沟通,通过对问题的讨论确定解决方案;
- (3) 培养团队协作精神,与小组成员共同完成本学习任务。

【任务描述】

在学习相关的热力学概念和基本定律的基础上,以 2~3 人学习小组的形式对以煤炭为燃料的火电厂生产流程进行深入学习和研讨,共同完成火电厂生产流程框图的绘制。在框图中能正确、清晰地表述出火电厂生产流程中的主要设备,设备中工质的流程,并能详细描述各设备的主要作用及其进行的能量转换、传递的方式。

【任务准备】

课前预习相关知识部分,独立思考并回答下列问题:

- (1) 热机为什么使用气体作为能量转换的工质?
- (2) 火电厂中为什么要使用压力、温度等测量仪表,其他还有哪些常用状态参数?
- (3) 生产过程中有哪些典型的热力过程?它们有什么特点?
- (4) 热力学第一定律的实质是什么?它在火电厂常用设备的热力计算中是如何体现的?
- (5) 热力学第二定律的实质是什么?它对工程实践的指导意义体现在什么地方?
- (6) 水蒸气定压产生过程的特点有哪些?在锅炉中是如何实现的?
- (7) 蒸汽动力循环有哪些基本类型?其具体流程、工质状态和能量转换如何?
- (8) 简述火电厂生产流程的组成及主要设备作用。
- (9) 简述火电厂生产各环节中工质状态、能量转换或传递的方式。

此外,还要通过自学了解系统框图绘制的工具软件,如 office 自带绘图工具、SmartDraw 等的应用方法,为任务实施奠定良好的基础。

【相关知识】

电能作为一种能源形式,是由一次能源(煤炭、石油、天然气、生物质能、水力、风力、核能、太阳能、地热能、潮汐能等)转变而来的。火力发电是我国电能生产的主要方式,截至 2013 年年底,全国发电设备总容量为 12.47 亿 kW,其中以煤炭、石油、天然气和生物质能等为燃料的火电设备容量占 69.1%,发电量比重则超过 80%,并将在较长的时期中占据主导地位。火力发电生产过程就本质而言,就是能量形式转换的过程,即燃料燃烧所释放的热能转变为转轴转动的机械能,最后转变为电能输出。其中,热能向机械能转换的过程是如何实现的、有什么样的规律,这需要具备基本的工程热力学知识。

一、工程热力学基本概念

工程热力学形成于 19 世纪上半叶,是在改进已被广泛利用的蒸汽机,制造合理的热机——即实现热能向机械能转换的动力机械的工程实践中逐步建立的学科。它重点研究工程技术上有关热能和机械能相互转换的客观规律及其物质性质之间的关系,其理论体系完善

后,对随后热机的工程实践起到重要的指导作用,使内燃机、蒸汽轮机、燃气轮机和喷气发动机等热机相继得到发展。

(一) 工质和热力系统

热能向机械能转换要通过热机实现。无论哪一种热机,总是用某种物质从某个能源(如煤燃烧后生成的高温烟气,称为高温热源或热源)获取热能,使它具有高能量而对机器做功,最后又把余下的热能排向大气或冷却水(称为低温热源或冷源)。在热机中实现热能与机械能相互转换的媒介物质称为工质。

1. 理想气体和实际气体

能量的转换,依赖于工质吸热、膨胀等变化过程。而要实现能量连续转换,还必须不断将新鲜工质引入能量转换装置中,并将工作终了的工质排出。因此要求工质要有良好的膨胀性和流动性,容易获取,热力性能优良,无毒、无腐蚀性等。由于气态物质体积最容易发生变化、流动性好,所以热机中使用的工质都是气体。如火电厂中使用水蒸气(又称蒸汽)作为工质。

为研究方便起见,将气体分为理想气体和实际气体两类。所谓理想气体,是指其分子可视为是一些弹性的、不占体积的质点且分子之间不存在相互作用力的气体。理想气体是一种不存在的假想气体,之所以引入其概念,目的在于简化气体分子运动的规律,以便用简单的函数关系式描述各状态参数之间的关系,简化分析计算。反之,若分子本身体积及分子间相互作用力不能忽略,这种气体称为实际气体。

在工程分析计算中,当实际气体的温度较高、压力较低时,可以忽略分子本身体积及分子之间的相互作用力,作为理想气体来处理。例如,工程中常用的气体 O_2 、 N_2 、 CO_2 等,以及由这些气体所组成的空气或烟气,在通常的压力和温度下,离液态区较远,均可视为理想气体。但对于锅炉所产生的水蒸气或很多制冷剂的蒸气,由于离液态较近,一般不能作为理想气体来处理。必须特别指出,锅炉烟气和大气中所含有的水蒸气,由于其含量很少,离液态较远,在不涉及水蒸气量变化的分析计算中仍可作为理想气体来研究。可见理想气体与实际气体没有明显界限,在什么情况下应视为何种气体,要根据工程计算的对象特点及所允许的误差范围而定。

2. 热力系统

在热力学中分析一个现象或过程时,常将研究的对象与周围有关的其他物体相分隔,这种人为分离出来的研究对象称为热力系统,简称系统。热力系统以外的其他有关物体统称为外界或环境,热力系统与外界的分界面就是边界。正确选择热力系统是对问题进行热力学分析的前提,划分方法则主要取决于所提出的研究任务和所采用的分析方法。例如,要计算某汽轮机的功率,那么将汽轮机或流过汽轮机的蒸汽作为热力系统就可以了;要研究如何提高火力发电厂的热效率,那就应该将与之相关的锅炉、汽轮机、水泵、凝汽器、回热加热器等都包括进热力系统才能进行分析;要研究该电厂对环境的污染,那么整个电厂,包括煤场、水源以及周围的大气都应该包括在热力系统中。

按热力系统与外界是否进行物质交换,可将热力系统分类为闭口(封闭)热力系统和开口热力系统两大类,也简称为闭口系统和开口系统。

此外,在热力学研究中还常用到绝热热力系统——热力系统与外界没有热量交换;孤立热力系统——热力系统与外界既无能量交换也无物质交换。

(二) 状态和状态参数

状态是指工质在某一瞬间所呈现的宏观物理状况。从各个不同方面描述工质状态的物理量就是状态参数，其数值仅取决于状态。动力工程中常用的状态参数有压力、温度、比体积、热力学能、焓和熵等。其中压力、温度、比体积可以直接测量，有明确的物理意义，称为基本状态参数；其他几个参数不能直接测量，需要利用基本状态参数进行计算或导出才能确定。

1. 压力

工程上习惯把物理学上的压强叫做压力，即垂直作用在物体表面并指向表面的力。气体的压力是组成气体的大量分子在紊乱的热运动中对容器壁频繁撞击的总效应。

压力常用符号 p 表示，其国际单位是 Pa（帕斯卡，简称为帕）。因 Pa 数值较小、不便使用，工程上常采用 MPa（兆帕）和 kPa（千帕）。

$$\left. \begin{aligned} 1\text{MPa} &= 1 \times 10^6 \text{Pa} \\ 1\text{kPa} &= 1 \times 10^3 \text{Pa} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

压力测量原理是建立在力平衡基础上的。如图 1-1 所示的 U 形管压力计，玻璃 U 形管内盛有测压用液体（水或水银），其一端与被测气体相接，另一端与大气相通。若气体的真实压力 p （称为绝对压力）与大气压力 p_b 不等时，则 U 形管两边液柱高度出现差值，此差值即为被测气体绝对压力与大气压力之间的压差。

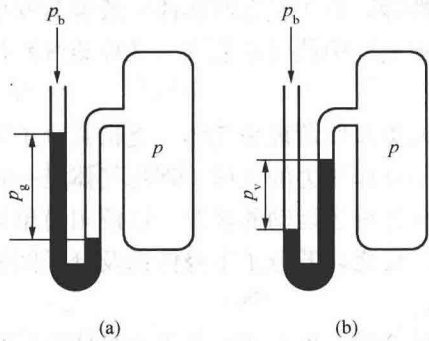


图 1-1 压力测量原理

(a) 表压力测量；(b) 真空测量

如图 1-1 (a) 所示，当所测容器中工质绝对压力 p 高于大气压力 p_b 时，表计指示的是超出大气压力的部分，称为表压力，用 p_g 表示。即

$$p_g = p - p_b \quad (1-2)$$

如图 1-1 (b) 所示，当所测容器的压力 p 低于大气压力 p_b 时，此时大气压力与绝对压力的差值称为真空，以 p_v 表示，即

$$p_v = p_b - p \quad (1-3)$$

作为工质状态参数的压力只能是绝对压力。这是由于当工质绝对压力不变时，大气压力会随各地的纬度、高度和气候条件有所变化，表压力和真空仍有可能变化，它们不具有状态参数的特性。

工程中，常用弹簧管压力表进行压力的就地测量，其测压原理和实物外观如图 1-2 所示。它是利用弹簧管在内、外压差作用下产生的变形，引起活动端产生微小位移，此位移通过传动机构拨动指针转动，从而显示压力读数。此外，火电厂中还常使用压力变送器将测量的表压力或真空转换为电信号进行远距离传输，以实现远程监控。

2. 温度

温度是描述物体冷热程度的状态参数。由于热

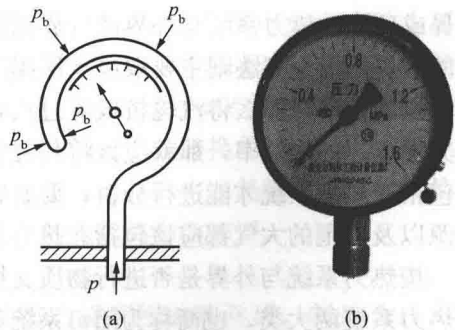


图 1-2 弹簧管压力表

(a) 测压原理；(b) 压力表实物

量只能从温度高的一侧传递给温度低一侧,所以温度是判断工质能否从外界接受热量或对外界传出热量的标志。温度的数值表示方法称为温标,它主要用来确定温度的基准点和分度方法。温标有多种表示,其中工程上常用的温标有热力学温标和摄氏温标。

热力学温标是建立在热力学第二定律基础上的,是一个完全不依赖于任何测温物质性质的完全客观的温标,用这种温标确立的温度称为热力学温度,其符号为 T ,单位是 K (开尔文,简称开)。热力学温标以水的汽、液、固三相共存的状态点——三相点为基准点,并定义其温度为 273.16K。1K 为水三相点温度的 $1/273.16$ 。

有了热力学温标后,其他温标的温度都是通过与热力学温度的关系建立的,如 1960 年第十一次国际计量大会重新定义的摄氏温度,其符号为 t ,单位是 $^{\circ}\text{C}$ (摄氏度)。它与热力学温度的关系是

$$t = T - 273.15 \quad (1-4)$$

由式 (1-4) 可知,两种温标的温度间隔完全相同,只是零点的定义不一样而已,即摄氏温标的零点为热力学温度 273.15K (一个标准大气压下水的冰点)。因此水的三相点温度比冰点高 0.01K。

温度的测量多是利用物质的某种特性与温度的变化关系。如生活中常用的水银温度计是利用水银的体积膨胀与温度变化间的关系。在火电厂中,为便于温度信号的远程监控,中、低温环境测量多使用热电阻,它是基于金属导体的电阻值随温度增加而增加的关系;而高温环境测量使用的热电偶则是利用了两种不同材料的金属线构成的闭合回路,当两个接点存在温差时回路中会产生相应的电动势。

3. 比体积

单位质量的工质所具有的体积叫做比体积,符号为 v ,单位为 m^3/kg 。比体积 v 和密度 ρ 互为倒数,即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-5)$$

比体积和密度都是用来说明工质状态的物理量,若比体积增大,表示工质膨胀;比体积减小,表示工质被压缩。火电厂中,蒸汽流经汽轮机时不断膨胀,其出口的比体积比进口时大几百倍;而汽轮机排汽在凝汽器中凝结成水,比体积减小几万倍。

4. 热力学能

热力学能是工质在某种状态下内部各种微观能量的总和,单位质量工质的热力学能称为比热力学能,常用 u 表示,单位为 J/kg 或 kJ/kg 。在热力学的能量分析中,它包括了分子运动的内动能(分子的移动动能、转动动能和分子内部原子的振动动能)和分子间由于存在相互作用力而具有的内位能。热力学能也是个状态参数,它是温度和比体积的函数,即

$$u = f(T, v) \quad (1-6)$$

5. 焓

在分析开口热力系统的能量转换过程时,压力为 p 、比体积为 v 的单位质量的流动工质除携带了热力学能 u 外,还具有推动能力 pv 。为了方便起见,把它们一起定义为一个新的状态参数——焓,它代表了流动的流体本身所携带的总能量。1kg 工质的焓称为比焓,用 h 表示,单位为 J/kg 或 kJ/kg 。其定义式为

$$h = u + pv \quad (1-7)$$

6. 熵

熵也是一个状态参数, 1kg 工质的熵称为比熵。它的定义是 1kg 工质在温度 T 下经历了一个无任何能量损失的微元过程, 在此过程中工质与外界交换了 δq 的热量, 则 $\frac{\delta q}{T}$ 为某一状态参数的微元变化量, 用 s 表示, 单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 或 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。其定义式为

$$ds = \frac{\delta q}{T} \quad (1-8)$$

(三) 状态的表述

研究热能和机械能相互转换过程时, 当涉及系统状态及其变化, 所针对的均为在没有外界影响条件下, 系统的宏观性质不随时间变化的平衡状态。对平衡状态的描述可使用状态方程式或状态参数坐标图。

1. 状态方程式

当工质处于平衡状态时, 其诸多状态参数之间总是存在某种特定的函数关系。反映状态参数间函数关系的数学表达式称状态方程式。状态方程式通常用工质的三个基本状态参数来表示, 可综合写成

$$f(p, v, T) = 0 \quad (1-9)$$

式 (1-9) 是状态方程式的一般形式, 对于不同类型工质, 其具体形式是不一样的。

如, 理想气体在一定的压力变化和温度变化范围内, 其状态方程式为

$$pv = R_g T \quad (1-10)$$

式中 p ——气体的绝对压力, Pa;

v ——气体的比体积, m^3/kg ;

R_g ——气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

T ——气体的热力学温度, K。

式 (1-10) 称为理想气体状态方程式。它表明对于同一种气体, 不论在什么状态下, R_g 的数值恒为常量, 但其值随气体的种类而异。常用气体的 R_g 值可从气体的热力性质表中查得。例如, 工程中常用的空气的 R_g 值为 $287\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

对于水蒸气等实际气体, 由于不能忽略气体分子体积和分子间相互作用力的影响, 其状态方程式的形式更为复杂。

2. 状态参数坐标图

由于工质处于平衡状态时, 只需用两个相对独立的状态参数 (即其中一个状态参数不能是另一个状态参数的函数) 便可唯一确定一个状态, 此时其他的状态参数便可随之而定。火电厂中随处可见的压力、温度仪表就是依据这一特性, 即通过监控压力、温度这两个参数来确定工质当前状态。

工程上还常用两个相互独立的状态参数作为一个平面直角坐标系的纵坐标和横坐标, 构成状态参数坐标图, 如图 1-3 所示。在图中任意一个点表示相应的一个状态, 不同的状态有不同的点。状态参数坐标图对分析工质状态变化过程提供了某种直观性, 有很大的实用意义。

在热力学分析中, 常使用以压力 p 为纵坐标、比体积 v 为横坐标的 $p-v$ 图 (压容图); 以热力学温度 T 为纵坐标、熵 s 为横坐标的 $T-s$ 图 (温熵图)。工质是水蒸气时还会用到以

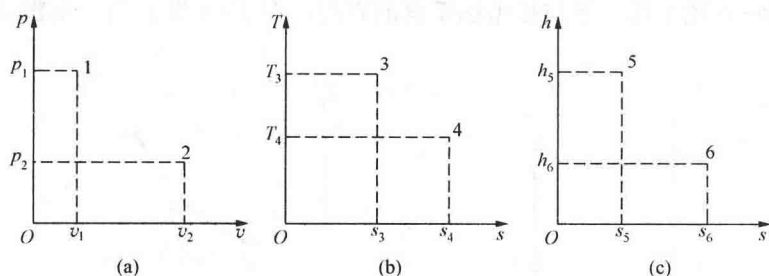


图 1-3 状态参数坐标图

(a) $p-v$ 图; (b) $T-s$ 图; (c) $h-s$ 图

焓 h 为纵坐标, 熵 s 为横坐标的 $h-s$ 图 (焓熵图)。

(四) 热力过程及其描述

火电厂中为实现热能向机械能的转换, 所使用的工质——水需要流过不同的热力设备, 并在各设备中发生状态的变化。如温度较低的水在锅炉中吸热后变化为高温、高压蒸汽; 蒸汽通过汽轮机膨胀做功, 其压力和温度降低、比体积增加。热力系统从某一初始状态, 经历一系列中间状态变化到某一最终状态, 则称其经历了一个热力过程。热力过程是热力系统内部与外界联系的一座桥梁, 只有通过热力过程才能实现能量的转换或传递。

1. 可逆过程

要让热力系统经历热力过程, 就必须存在某种不平衡势差, 如水在锅炉吸热时要有温差, 蒸汽在汽轮机中膨胀时要有压差等。此时, 热力系统原有的平衡遭到破坏, 从而使其状态发生变化。但这样一来, 热力系统状态处于随时变化中, 无法用确定的状态参数来描述, 导致热力过程无法分析和计算。可逆过程就是为了解决这一问题而引入的, 它是实际过程理想化后所得到的一种科学抽象概念, 是进行热力学分析时一种重要的研究方法。可逆过程定义为: 当系统完成某一热力过程后, 如果能使系统沿相同的路径逆行回复到原来的状态, 且相互作用中所涉及的外界也回复原态, 而没有留下任何变化, 则此过程称为可逆过程。可逆过程具备以下两个特点:

- (1) 在过程进行时, 热力系统和外界恒处于平衡状态, 即随时保持力平衡和热平衡;
- (2) 在过程变化期间, 无任何能量的不可逆损耗存在。

实际过程中的不可逆因素是客观存在、不可消除的, 因此工程中涉及的热力过程都是不可逆过程。但引入可逆过程后, 就可以利用系统的状态参数变化来计算系统与外界的能量交换, 而不必考虑外界复杂繁乱的变化, 从而解决了热力过程的计算问题。同时, 可逆过程突出了能量转换的主要矛盾, 通过对它的分析, 可以选择安排更合理的热力过程, 以达到预期的效果。对于实际过程和理想过程的偏差, 可采用结果修正的方法来处理。

2. 典型的热力过程

工程中的热力过程形式是多种多样的, 但热力设备中常见的一些热力过程, 往往近似具有某一简单特征。例如, 汽油机气缸中工质的燃烧加热过程, 燃烧速率很快, 压力急剧上升而体积几乎保持不变; 水蒸气流过汽轮机叶片, 体积膨胀、压力降低, 但向外界的散热与做功量相比可以忽略不计。这些热力过程可近似地概括为以下四种典型的热力过程。

- (1) 定容过程。工质比体积保持不变的热力过程叫定容过程。对于理想气体, 定容过程

的过程曲线在 $p-v$ 图上是一条与横坐标垂直的直线, 在 $T-s$ 图上为一指数函数曲线, 如图 1-4 所示。

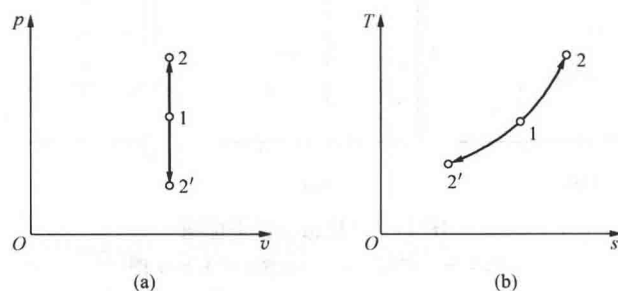


图 1-4 定容过程

(a) 在 $p-v$ 图上; (b) 在 $T-s$ 图上

(2) 定压过程。工质压力保持不变的热力过程称为定压过程。理想气体的定压过程线在 $p-v$ 图上是一条与横坐标平行的直线。在 $T-s$ 图上, 则是一条比定容过程线更为平坦些的指数函数曲线, 如图 1-5 所示。

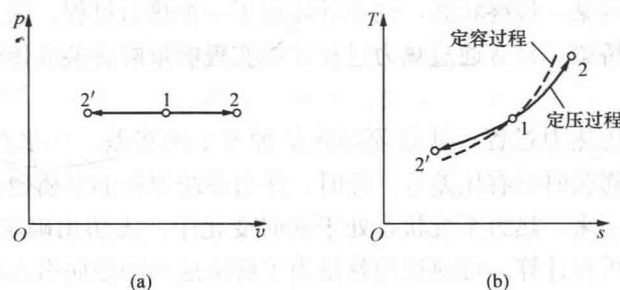


图 1-5 定压过程

(a) 在 $p-v$ 图上; (b) 在 $T-s$ 图上

(3) 定温过程。工质温度保持不变的热力过程称为定温过程。根据理想气体状态方程, 在定温过程中 $pv = \text{定值}$ 。如图 1-6 所示, 理想气体定温过程线在 $p-v$ 图上是一条等边双曲线, 在 $T-s$ 图上是一条水平线。

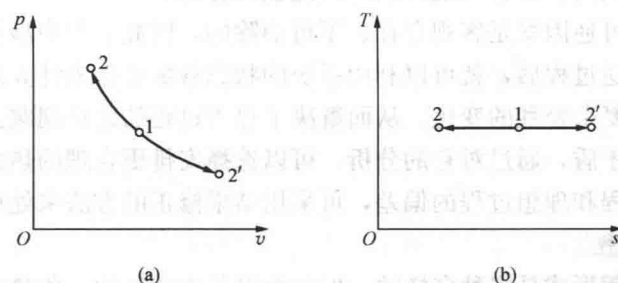


图 1-6 定温过程

(a) 在 $p-v$ 图上; (b) 在 $T-s$ 图上

(4) 绝热过程。工质与外界没有热量交换的热力过程叫做绝热过程, 绝热过程的特征为 $\delta q = 0$ 。如水蒸气在汽轮机中的膨胀过程就可以作为绝热过程分析。绝热过程中有